古尔班通古特沙漠降雨过程中梭梭与白梭梭冠层养分的变化特征

岳跃蒙[1,2,3]， 李晨华[1,2]， 徐 柱[4]， 唐立松[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院阜康荒漠生态实验站，新疆 阜康 831505；3. 中国科学院大学，北京 100049；
4. 新疆天池管理委员会博格达生态环境监测站，新疆 阜康 831500）

摘 要：干旱区养分相对匮乏，雨水流经冠层后有效的养分输入对干旱区植物的生长发育意义重大。本文通过对古尔班通古特沙漠南缘主要建群种梭梭（*Haloxylon ammodendron*）与白梭梭（*Haloxylon persicum*）降雨过程中冠层养分的研究，分析树干茎流、穿透雨以及雨水中碳、氮、磷的浓度差异，明确雨水流经植物冠层后各离子的变化特征。结果表明，雨水在经过梭梭与白梭梭冠层后总有机碳（TOC）、总氮（TN）浓度增加显著，总磷（TP）增加并不显著。铵态氮（NH_4^+-N）浓度变化与TN基本一致，硝态氮（NO_3^--N）、亚硝态氮（NO_2^--N）浓度差异性不完全显著；其中，树干茎流有机氮（TON）的比例最高，在TN中所占比例始终大于50%。对于不同养分输入的平均浓度，除TP、NO_3^--N外，其他离子均有所增加；TP、NO_3^--N、NO_2^--N浓度较低，在树干茎流、穿透雨以及雨水中的变异系数较大。

关键词：梭梭（*Haloxylon ammodendron*）；白梭梭（*Haloxylon persicum*）；冠层；离子浓度；古尔班通古特沙漠

植物冠层对雨水的再分配过程较为复杂，该过程涉及水文、水土保持、生态等多个方面[1]。降雨在经过植物冠层时，淋洗植物体表面的降尘以及植物本身分泌的养分，以穿透雨和树干茎流的形式流向地面或汇集到植物根部，各离子浓度产生较大的变化[2]。其中，雨水中的大部分离子在经过冠层后表现为浓度增强，即正淋溶现象；但是也有部分离子表现为浓度降低，即负淋溶现象[3]。不同地区植物冠层输入的养分量存在较大差异[4]，这种差异不仅与植物对雨水中各离子的吸收特性有关，还与雨强、雨频、降雨间隔以及树种本身的特征（胸径、树高、叶面积大小、冠层大小、树皮的粗糙度等）有关[5]。溶于雨水中的养分均是水溶性的，能直接被植物吸收利用，有效的促进养分循环以及植物自身生长发育[6]。

对于降雨引起冠层养分变化特征的研究主要集中在降雨较多的东部地区，特别是我国东南部的一些热带雨林地区。普遍的观点认为，虽然树干茎流在森林水文循环过程中所占比重较小[7]，但是其对树干的冲刷作为森林系统水分输入的第一个环节，在森林生态系统中的作用不容忽视[8]。随着林冠密度的增加，粉尘等物质的吸附量增加，雨水经植物冠层时对各养分的富集作用也会增强[9]。对于降雨较少、水分作为第一限制因素的干旱地区，碳、氮、磷是继水分之后，影响植物生长重要的限制因素[10]。干旱地区相对于其他地区来说，降雨的时间间隔较大，湿沉降所占比例较小[11]，而长时间降尘的沉积可能会加强冠层的养分淋溶量。在本研究区中，前人对梭梭和白梭梭冠层对雨水的分配特征进行了研究[12]，或对梭梭冠层对雨水再分配后引起的“肥岛”和“盐岛”效应开展研究[13]，对梭梭与白梭梭降雨过程中冠层养分的变化特征的认识仍不充分。而本研究以古尔班通古特沙漠的梭梭和白梭梭为研究对象，通过测定雨水及雨水流经2种植物冠层后形成的树干茎流和穿透雨中碳、氮、磷含量，明确梭梭与白梭梭降雨过程中冠层养分的变化特征，为荒漠区植物冠层的养分循环以及植被的保护及恢复提供理论依据。

收稿日期：2019-11-26； **修订日期**：2020-08-30
基金项目：国家自然科学基金（41671051，41671114）共同资助
作者简介：岳跃蒙(1993-)，男，在读硕士研究生，主要从事干旱区植物生态学研究. E-mail: yueyuemeng17@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：李晨华. E-mail: lichenhua@ms.xjb.ac.cn

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于准噶尔盆地古尔班通古特沙漠的南缘，它是中国的第二大沙漠，也是中国最大的半固定、固定沙漠，面积高达4.88×10⁴ km²。本研究在古尔班通古特沙漠南缘进行(44.29°N，87.93°E，海拔460 m)，该区属于典型的温带干旱气候，夏季炎热，冬季寒冷，最高气温高达42.3 ℃，最低气温低至-37.0 ℃，年均温7.5 ℃。年降雨量70～150 mm，年蒸发量约1000 mm，较大的蒸发量导致沙漠中无地表径流产生、地下水位较深。该区的植物种类比较丰富，沙丘垄间和垄顶存在着较大的差异。垄间主要植物有梭梭、绢蒿(*Seriphidium*)以及短命植物尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhinchum*)、荒漠庭荠(*Alyssum desertorum*)等。垄顶主要植物有白梭梭(*Haloxylon persicum*)、白皮沙拐枣(*Calligonum leucocladum*)、蛇麻黄(*Ephedra przewalskii*)以及多种短命植物[14]。

1.2 样地选择

样地位于距离古尔班通古特南部边缘4～5 km的区域，该区植物长势较好，距离边缘有一定的距离，受人类活动影响较小。选择长势良好、冠幅均匀且分布均匀、互不干扰的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)与白梭梭各10株(表1)。

1.3 水样收集

水样收集主要集中在2017年5—10月、2018年5—7月。研究期间降雨39次，其中0～0.5 mm(包含0.5 mm)13次，0.5～1 mm(包含1 mm)7次，1～5 mm(包含5 mm)15次，5～10 mm(包含10 mm)2次，10 mm以上2次。样本有效采集共5次，降雨量分别为6.1 mm、10.4 mm、13.7 mm、9.7 mm、6 mm(按时间先后顺序)。

树干茎流收集：磨砂纸轻轻打磨树干距地面10 cm的位置至光滑，用绝缘的铝芯电话线绑定在梭梭和白梭梭树干已经打磨过的位置；用硅酮透明且为中性的玻璃胶将电线与树干的接触点密封，一侧留出出水口，并在出水口处放置体积为10 L的聚乙烯塑料桶；将植物冠层形成的树干茎流导入到塑料桶中。

穿透雨收集：在梭梭与白梭梭较为均匀的冠幅下，以树干为中心的0°、120°、240°辐射方向上放置与标准雨量筒一样内径均为20 cm的铁皮漏斗若干(根据冠幅大小比例设置不同数量漏斗)，漏斗下方放置接收装置；铁皮漏斗外沿高10 cm，能有效的避免因雨水滴落后迸溅导致水量的减少及浓度的变化。

降雨收集：在梭梭和白梭梭试验区远离植物的空地各均匀的设置3个铁皮漏斗来进行雨水的采集。

所有漏斗内部设置一层纱网，在降雨前对铁皮漏斗的内槽定期清理，以防止掉落的枝条和昆虫等对水样中各离子浓度产生影响。树干茎流、穿透雨以及降雨的水样的收集使用500 mL聚乙烯收集瓶，收集瓶需提前用稀盐酸浸泡24 h，用清水洗净后再用去离子水多次清洗。为防止微生物引起的氮素的转变，在收集的水样中加入乙二醇[15]，采集的水样带回实验室后用中速滤纸进行过滤，过滤后的水样冷冻保存，等样本采集完成后分批测定。

1.4 水样的测定

用总有机碳分析仪(1030，美国)测定TOC。用流动分析仪(AA3，德国)测定TP、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N。其中，TP和NH_4^+-N在660 nm下进行比色测定，TN、NO_3^--N、NO_2^-在550 nm下进行比色测定。TP和TN都采用硫酸肼法，通过紫外消化器，除了每个试剂管药品的差异，TP还需要通过95 ℃加酸水解转为正磷酸盐。

1.5 数据处理

树干茎流、穿透雨、降雨中的TON、无机氮(TIN)计算方式：

$$N_{TIN} = N_{NH_4^+-N} + N_{NO_3^--N} + N_{NO_2^--N}$$
$$N_{TON} = N_{TN} - N_{TIN}$$

表1 梭梭与白梭梭基本特征

Tab.1 Basic characteristics of *H. ammodendronand H. persicum*

坡下/梭梭	位置	树高/m	基茎/cm	冠幅/m	树冠面积/m²
梭梭	垄间	2.960±0.303	9.422±0.764	1.93±0.112	2.955±0.329
白梭梭	垄顶	3.120±0.153	9.549±1.546	2.670±0.509	6.370±2.294

式中:N_{TIN} 为无机氮浓度;$N_{NH_4^+-N}$ 为铵态氮浓度;$N_{NO_3^--N}$ 为硝态氮浓度;$N_{NO_2^--N}$ 亚硝态氮浓度;N_{TON} 为有机氮浓度;N_{TN} 为总氮浓度。公式中浓度单位为 $mg \cdot L^{-1}$。

树干茎流、穿透雨以及降雨中各离子浓度的差异性用SPSS 20.0进行方差分析,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$。截尾均值的误差用误差棒表示。

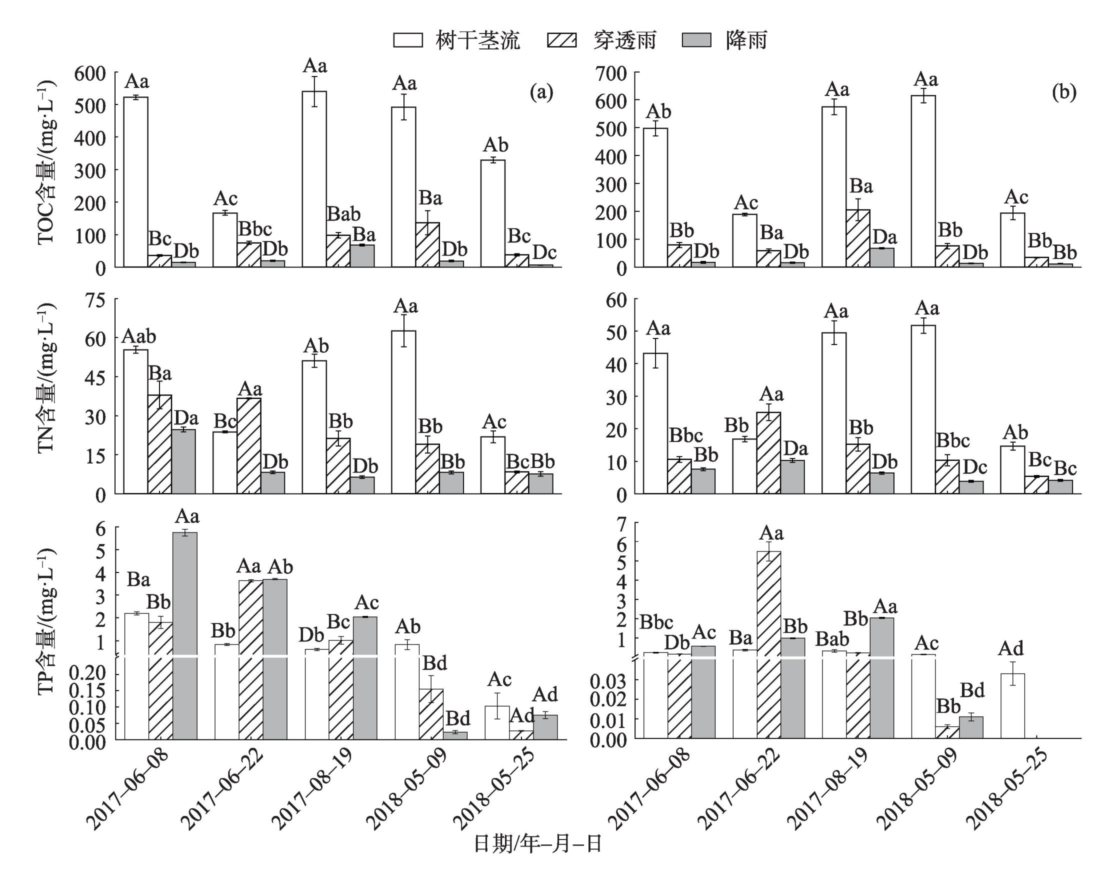
2 结果与分析

2.1 树干茎流、穿透雨、降雨中碳、氮、磷变化特征

由图1可以看出,雨水经过植物冠层后TOC、TN含量增加显著,即雨水中的离子浓度含量最低;不同时期离子在同一水样中的含量存在显著性差异($P<0.05$),同一时期采集的梭梭或白梭梭3种水样间离子的浓度也存在显著性差异($P<0.05$)。相比而言,各时期TP含量并未表现出显著差异($P>0.05$),同时也多次出现雨水中的浓度大于树干茎流和穿透雨。就整体的各离子浓度的变化规律而言,梭梭与白梭梭较为一致。

2.2 树干茎流、穿透雨、降雨中氮素组成及比例变化特征

通过比较图2与图1发现,与TOC、TN相比,在同一采集日树干茎流、穿透雨、降雨中 NO_3^--N、NO_2^--N浓度差异并不显著($P<0.05$);NH_4^+-N与TN变化规律较为一致。并且 NO_3^--N、NO_2^--N含量较低且不稳定,在TIN的组成比例中,多数情况下,NH_4^+-N的含量要大于 NO_3^--N和 NO_2^--N(图3)。在TN的各类组成离子中,TON的含量相对较高。其中,梭梭与白梭梭树干径流中,TON比例范围分别为62.45%~78.43%、51.12%~72.43%,TON的含量明显大于50%;在穿透雨、降雨中的最小比例和最大比例分别为28.11%、25.18%和78.30%、67.81%,变幅相对较大。树干茎流中梭梭 NO_3^--N与 NO_2^--N之和占TN的比例的最高值与最低值分别为21.42%、0.13%,白梭梭为32.49%、0.25%;梭梭



注:不同大写字母表示同一采集日不同类水样(树干茎流、穿透雨、降雨)间的差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示不同采集日同一类水样的差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 梭梭(a)和白梭梭(b)树干茎流、穿透雨以及降雨中TOC、TN、TP含量

Fig. 1 Stemflow, throughfall and rainfall TOC, TN, TP content of *H. ammodendron* (a) and *H. persicum* (b)

树干茎流 穿透雨 降雨

(a) (b)

NO_3^--N含量/(mg·N·L⁻¹)

NO_2^--N含量/(mg·N·L⁻¹)

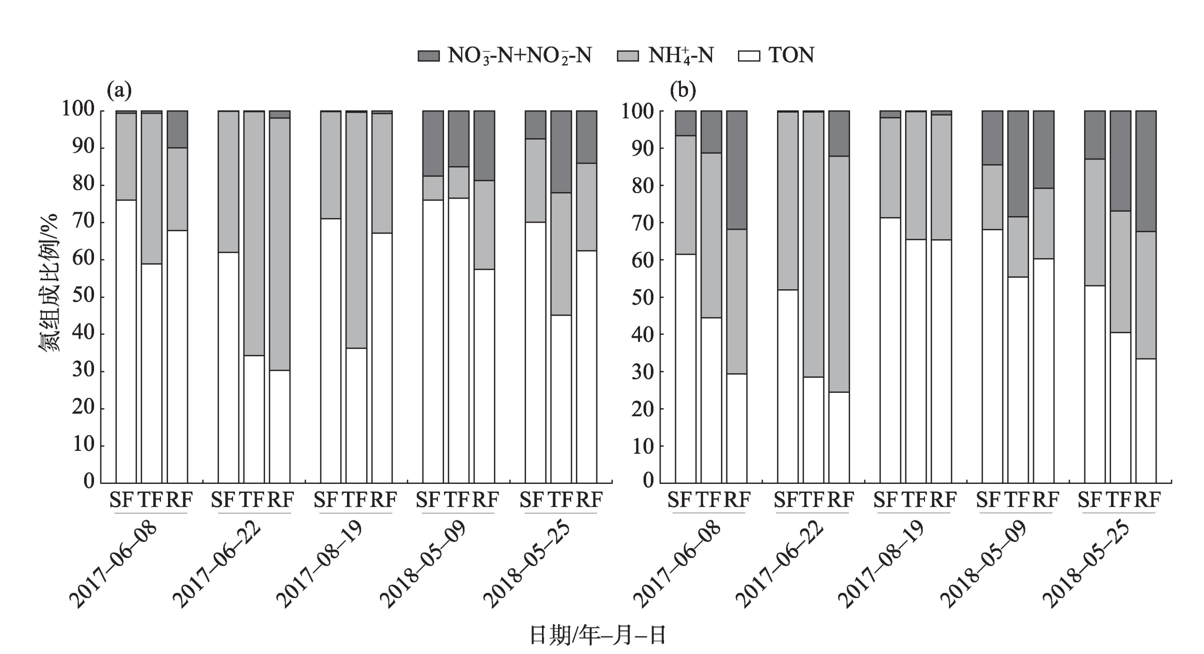
NH_4^+-N含量/(mg·N·L⁻¹)

2017-06-08 2017-06-22 2017-08-19 2018-05-09 2018-05-25

日期/年–月–日

图2 梭梭(a)和白梭梭(b)树干茎流、穿透雨以及降雨中 NO_3^--N、NO_2^--N、NH_4^+-N含量

Fig. 2 Stemflow, throughfall and rainfall NO_3^-–N, NO_2^-–N, NH_4^+–N content of *H. ammodendron* (a) and *H. persicum* (b)



注:SF为树干茎流,TF为穿透雨,RF为降雨。

图3 梭梭(a)与白梭梭(b)氮组成比例

Fig. 3 Nitrogen composition ratio of *H. ammodendron* (a) and *H. persicum* (b)

NH_4^+-N占TN的比例的最高值与最低值分别为69.11%、6.69%，白梭梭为70.25%、16.04%，显然，NO_3^--N与NO_2^--N之和占比较低，而NH_4^+-N比例变化幅度较大。

2.3 树干茎流、穿透雨、降雨中各离子浓度总体均值变化特征

TOC、TN、NH_4^+-N、NO_2^--N、TIN、TON含量与降雨中的离子含量相比均有一定程度的上升，TP、NO_3^-含量表现为一定程度的下降，TP、NO_3^--N、NO_2^--N的差异性并不显著(P<0.05)(表2)。梭梭与白梭梭树干茎流TOC含量分别是降雨的16.27、16.49倍，梭梭与白梭梭穿透雨TOC含量分别是降雨的3.04、3.61倍，两者的浓度变化较为相似。梭梭树干茎流和穿透雨与降雨中的TP浓度的比值分别为0.40、0.57，白梭梭树干茎流与降雨中的TP浓度的比值为0.32，梭梭与白梭梭穿透雨与降雨中NO_3^--N的比值分别为0.87、0.97，均表现为雨水中离子浓度含量高于树干茎流和穿透雨，即在通过冠层时TP和NO_3^--N含量减少。对比雨水、穿透雨和树干茎流3种情况下各离子的变异系数，梭梭的最大变异系数分别是0.473(TP)、0.585(NO_3^--N)和0.904(NO_2^--N)，最小变异系数分别为0.236(NO_2^--N)0.227(TN)、0.143(TIN)；白梭梭的最大变异系数分别是0.522(TP)、0.914(TP)和0.503(NO_3^--N)，最小变异系数分别为0.168(TON)0.250(TN)、0.166(NH_4^+-N)，明显变异系数较大值出现在TP、NO_3^--N、NO_2^--N离子中。

3 讨论与结论

雨水在经过梭梭与白梭梭冠层后TOC、TN、NH_4^+-N浓度增加，NO_3^--N、NO_2^--N、TP出现浓度减少的现象，尤其是NO_3^--N与TP，但这种现象并不稳定。杨林等[16]证明青檀等树种的树皮对TP就有一定的吸收作用，樊后保[17]的研究表明，雨水中的NO_3^--N在经过杉木冠层时会被吸收而导致含量减小，张捷等[18]测得雨水在经过冠层后TP和NO_3^--N的净输入量为负，说明了TP和NO_3^--N存在浓度减少的现象，与本研究结论一致。研究区有学者利用$\delta^{18}O$定位高湿度环境下水分的去向，证明梭梭会直接吸收空气中的水分[19]，雨水中离子浓度减少可能与降雨期间高湿度环境下植物的吸收有关[20-21]。在本研究中，雨水中TOC、TN、NH_4^+-N含量相对较高，少量的吸收不会对整体规律产生较大的影响，即养分的淋洗、淋溶效果大于吸收、吸附。NO_3^--N、

表2 树干茎流、穿透雨、降雨碳、氮、磷含量均值和变异系数(Cv)

Tab.2 Average values and variation coefficients (Cv) of carbon,nitrogen and phosphorus in stemflow, throughfall and rainfall

/(mg·L^{-1})

树种	项目	TOC	TP	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	TIN	TON
梭梭	树干茎流	409.684a (71.317)	0.919a (0.347)	42.957a (8.420)	9.144ab (2.083)	1.823a (1.406)	0.863a (0.780)	11.830a (1.692)	31.127a (7.525)
	Cv	0.174	0.378	0.196	0.228	0.771	0.904	0.143	0.242
	穿透雨	76.468b (18.999)	1.327a (0.660)	24.64bc (5.604)	11.201a (4.058)	0.898a (0.525)	0.123a (0.051)	12.222a (3.673)	12.418bc (2.867)
	Cv	0.248	0.497	0.227	0.362	0.585	0.411	0.300	0.231
	降雨	25.187b (10.788)	2.318a (1.096)	11.033cd (3.432)	3.392b (0.900)	1.033a (0.449)	0.02a (0.004)	4.445b (1.131)	6.587c (2.653)
	Cv	0.428	0.473	0.311	0.265	0.435	0.236	0.254	0.403
白梭梭	树干茎流	413.832a (92.831)	0.229a (0.062)	35.167ab (8.067)	9.787ab (1.629)	2.301a (1.156)	0.379a (0.186)	12.466a (2.134)	22.701ab (6.491)
	Cv	0.224	0.271	0.229	0.166	0.503	0.491	0.171	0.286
	穿透雨	90.693b (29.843)	1.179a (1.078)	13.287cd (3.327)	6.275ab (2.939)	1.066a (0.518)	0.076a (0.042)	7.417ab (2.841)	5.870c (1.549)
	Cv	0.329	0.914	0.250	0.468	0.486	0.555	0.383	0.264
	降雨	25.093b (10.640)	0.726a (0.379)	6.43d (1.182)	2.759b (1.051)	1.097a (0.390)	0.075a (0.048)	3.931b (1.224)	2.499c (0.419)
	Cv	0.424	0.522	0.184	0.381	0.355	0.635	0.311	0.168

注：括号内的数字为标准差，字母代表同一离子在2种植物不同水样中的差异显著(P<0.05)。

NO_2^--N、TP离子浓度差异较大且浓度含量较低，表现出较强的不稳定性，少量的吸收对整体规律产生较大的影响，很容易出现了养分的吸收、吸附效果大于淋洗、淋溶的情况。植物冠层对某些离子的吸收机理还不明确，主要是冠层降尘以及植物冠层分泌的养分含量未知，具体的比例还需进一步研究，但是植物冠层对 NO_3^--N、NO_2^--N、TP的吸收现象确实存在[19,20-21]。

冯宗炜等[22]指出，雨水经过林冠层后氮磷浓度的变化，不仅取决于枝条树干上的降尘量，还和树木上的附生生物有很大关系。Lindberg等[23]指出在经过冠层的同时，雨水会和植物产生离子交换，使各离子浓度发生变化，达到雨水与冠层的离子交换平衡状态[24]。这种离子平衡可能与生境、物种本身以及降雨特征有很大的关系,这与本研究各离子浓度差异较大的结论基本一致。具体而言，研究区梭梭生存的垄间因生物结皮的覆盖，表现为较好的固定性，而白梭梭生存的垄顶基本裸露，很容易在起风时产生风沙运动[25]，这种风沙在冠层的沉积也会对梭梭与白梭梭的淋溶特征造成一定的影响。李从娟等[26]研究发现，垄间与垄顶有机质、全氮、全磷含量分别为2.40 $g\cdot kg^{-1}$、0.13 $g\cdot kg^{-1}$、0.44 $g\cdot kg^{-1}$和1.48 $g\cdot kg^{-1}$、0.06 $g\cdot kg^{-1}$、0.29 $g\cdot kg^{-1}$，明显垄间各离子的含量大于垄顶。尽管垄顶风沙流动性比较大，可能造成的白梭梭的风沙沉积量加大，但是离子浓度含量较低，因此，研究中发现梭梭与白梭梭养分变化特征的差异并不突出，风沙沉积或所处的生境养分的不同没有使2种植物冠层养分变化特征产生较大的差异。梭梭与白梭梭的树干茎流率存在一定的差异[27]，雨水流经冠层时因为结构和生理上的差异对各离子吸附与吸收也存在差异性，但梭梭与白梭梭冠层经过雨水淋溶后离子浓度整体浓度规律并无较大差异。

冠层氮素在雨水的淋溶作用下，梭梭与白梭梭树干茎流中TON的富集效果最为明显，在TN中的比例均大于50%。郑利霞等[28]研究表明，纯净降雨中TON的含量（3.09 $kg\cdot N\cdot hm^{-2}$）占混合沉降（降雨+降尘）TON含量（5.40 $kg\cdot N\cdot hm^{-2}$）的57%，证明了降尘也是有机氮的一个重要来源。因此，研究区梭梭和白梭梭树干茎流中TON含量的增加可能与冠层以及树干上的降尘有很大关系。本研究中梭梭与白梭梭雨水中TON占TN的比例范围较大，雨水中的TON含量很不稳定，这与Russell等[29]和Scudlark等[30]研究结果一致。而部分雨水中TON的比例超过了50%，可能与实验期间铁皮漏斗上贴附的降尘有关。这些可溶性TON流经冠层进入土壤会被植物直接吸收利用，有效的提高生态系统的初级生产力[31]。就总体均值而言，梭梭与白梭梭树干茎流和穿透雨中的TOC、TN、NH_4^+-N、NO_2^--N、TIN、TON都表现出了一定的富集作用。其中TOC、TN、NO_2^--N、TON的树干径流的富集作用明显比穿透雨更强，这与诸多研究较为一致[16,18]。大多数离子在经过雨水对植物冠层的淋洗后，含量明显增多。粗糙的树皮比枝叶更能吸附大气中的降尘，并且干旱半干旱地区树干茎流量占比为2.7%~10.6%不等[32]，茎流中的离子会产生浓缩现象[33]，离子浓度进一步增加。梭梭与白梭梭树干茎流、穿透雨中TP、NO_3^--N、NO_2^--N平均浓度变异系数值相对较大，说明植物冠层对这3种离子的吸附、吸收以及淋溶作用使离子浓度产生较大的变化。

研究区降雨量较少，且都以小雨量、低强度降雨为主。雨水流经植物冠层时，低强度降雨能更好延长与整个植物冠层离子交换的过程，促进冠层对养分的吸收；次数有限的高强度降雨能对冠层产生较强的冲刷效果，使冠层上沉积的养分在短时间内汇集到根部被吸收。目前，植物冠层对各个离子吸收能力的大小有待进一步研究，造成冠层产生离子交换现象的内部和外部因素尚不明确，因此，加强对干旱区植物冠层养分循环的研究对植物生长发育以及整个干旱区养分循环都有着重要的生态意义。

参考文献（References）：

[1] 杨新国, 古君龙, 王兴, 等. 荒漠草原中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)冠层穿透雨的发生与分布特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 134–141. [Yang Xinguo, Gu Junlong, Wang Xing, et al. Occurrence and distribution of throughfall under *Caragana intermedia* canopy in desert steppe[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 134–141.]

[2] 余新晓. 森林生态水文[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004. [Yu Xinxiao. Forest Ecological Hydrology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004.]

[3] 闫文德, 田大伦, 陈书军, 等. 4个树种茎流养分特征研究[J]. 林业科学, 2005, 41(6): 50–56. [Yan Wende, Tian Dalun, Chen Shujun, et al. Nutrient characteristics of stem-flow in four tree species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(6): 50–56.]

[4] Parker G G. Throughfall and stemflowin the forest nutrient cycle [J]. Advances in Ecological Research, 1983, 13(4): 57−133.

[5] Levia D F, Frost E E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems[J]. Journal of Hydrology(Amsterdam), 2003, 274(1−4): 1−29.

[6] 马雪华. 在杉木林和马尾松林中雨水的养分淋溶作用[J]. 生态学报, 1987, 9(1): 15−20. [Ma Xuehua. Effects of rainfall on the nutrient cycling in man-made forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*[J]. Acta Ecologica Sinica, 1987, 9(1): 15−20.]

[7] André F, Jonard M, Ponette Q. Effects of biological and meteorological factors on stemflow chemistry within a temperate mixed oak-beech stand[J]. Science of the Total Environment, 2008, 393 (1): 72−83.

[8] Návar J. Stemflow variation in Mexico's Northeastern forest communities: Its contribution to soil moisture content and aquifer recharge[J]. Journal of Hydrology, 2011, 408(1−2): 35−42.

[9] 黄智军, 刘青青, 侯晓龙, 等. 长汀不同郁闭度马尾松林降雨淋溶养分输入特征[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(2): 129−134. [Huang Zhijun, Liu Qingqing, Hou Xiaolong, et al. Characteristics of rainfall leaching nutrient input in *Pinus massoniana* forest with different canopy density of Changting[J]. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(2): 129−134.]

[10] Smart R M , Barko J W . Nitrogen nutrition and salinity tolerance of *Distichlis spicata* and *Spartina alterniflora*[J]. Ecology, 1980, 61 (3): 630−638.

[11] 张伟, 刘学军, 胡玉昆, 等. 乌鲁木齐市区大气氮素干沉降的输入性分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 710−716. [Zhang Wei, Liu Xuejun, Hu Yukun, et al. Analysis on input of atmospheric nitrogen dry deposition in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2011, 28 (4): 710−716.]

[12] 戴岳, 郑新军, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠梭梭和白梭梭树干茎流特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 867−872. [Dai Yue, Zheng Xinjun, Li Yan, et al. Stemflow of *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum* the Gurbantonggut Desert[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(5): 867−872.]

[13] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 树干径流对梭梭肥岛和盐岛效应的作用机制[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4819−4826. [Li Congjuan, Lei Jiaqiang, Xu Xinwen, et al. The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for *Haloxylon ammodendron* Bge[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4819−4826.]

[14] 钱亦兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠纵向沙垄植被空间异质性[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 420−427. [Qian Yibing, Wu Zhaoning, Yang Haifeng, et al. Vegetation spatial heterogeneity across longitudinal dunesin the Southern Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(2): 420−427.]

[15] 王志辉, 张颖, 刘学军, 等. 黄土区降水降尘输入农田土壤中的氮素评估[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3295−3301. [Wang Zhihui, Zhang Ying, Liu Xuejun, et al. Dry and wet nitrogen deposition in agricultural soils in the Loess area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3295−3301.]

[16] 杨林, 王明, 王传华. 神农架地区次生林主要树种林冠雨的氮磷营养特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1018−1025. [Yang Lin, Wang Ming, Wang Chuanhua. Nitrogen and phosphorous characteristics of canopy rainfall of eight dominant tree speciesin secondary forests of Shennongjia Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1018−1025.]

[17] 樊后保. 杉木林截留对降水化学的影响[J]. 林业科学, 2000, 36 (4): 2−8. [Fan Houbao. Effects of canopy interception by Chinese fir forests on precipitation chemistry[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(4): 2−8.]

[18] 张捷, 刘洋, 张健, 等. 马尾松人工林林冠层降雨再分配及其氮磷特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1451−1458. [Zhang Jie, Liu Yang, Zhang Jian, et al. Rainfall redistribution by crown layer and variation characteristics of nitrogen and phosphorus in *Pinus massoniana* plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1451−1458.]

[19] Gong X W, Lü G H, He X M, et al. High air humidity causes atmospheric water absorption via assimilating branches in the deep-rooted tree *Haloxylon ammodendron* in an arid desert region of Northwest China[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1−13.

[20] Goldsmith, Gregory R. Changing directions: The atmosphere-plant-soil continuum[J]. New Phytologist, 2013, 199(1): 4−6.

[21] Yan X, Zhou M, Dong X, et al. Molecular mechanisms of foliar water uptake in a desert tree[J]. AoB Plants, 2015, 129: 1−14.

[22] 冯宗炜, 陈楚莹, 王开平, 等. 亚热带杉木纯林生态系统中营养元素的积累、分配和循环的研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(4): 245−256. [Feng Zongwei, Chen Chuying, Wang Kaiping, et al. Studies on the accumulation, distribution and cycling of nutrient in the ecosystem of the pure stand of subtropical *Cunninghamia lanceolata* forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1985, 9(4): 245−256.]

[23] Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D, et al. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest[J]. Science, 1986, 231(4734): 141−145.

[24] Potter C S, Swank R W T. Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating Southern appalachian forest canopy[J]. Journal of Ecology, 1991, 79(1): 97−115.

[25] Wang X, Wang T, Jiang J, et al. On the sand surface stability in the Southern part of Gurbantünggüt Desert[J]. Science in China(Series D), 2005, 48(6): 778−785.

[26] 李从娟, 马健, 李彦, 等. 梭梭和白梭梭主根周围土壤养分的梯度分布[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1174−1180. [Li Congjuan, Ma Jian, Li Yan, et al. Nutrient gradient distribution in soil around taproots of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum*[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5): 1174−1180.]

[27] 张卫宾, 刘彤, 李宽亮, 等. 古尔班通古特沙漠梭梭与白梭梭利用降雨的差异[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1612−1619. [Zhang Weibin, Liu Tong, Li Kuanliang, et al.Difference of rainfall use strategy between *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicumin* Gurbantonggut Desert[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(8): 1612−1619.]

[28] 郑利霞, 刘学军, 张福锁. 大气有机氮沉降研究进展[J]. 生态学报, 2006, 27(9): 3828-3834. [Zheng Lixia, Liu Xuejun, Zhang Fusuo.Atmospheric deposition of organic nitrogen: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 27(9): 3828-3834.]

[29] Russell K M, Galloway J N, Macko S A, et al. Sources of nitrogen in wet deposition to the Chesapeake Bay region[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(14-15): 2453-2465.

[30] Scudlark J R, Russell K M, Galloway J N, et al. Organic nitrogen in precipitation at the mid-Atlantic U.S. Coast: Methods evaluation and preliminary measurements[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(10): 1719-1728.

[31] Peierls B L, Paerl H W. Bioavailability of atmospheric organic nitrogen deposition to coastal phytoplankton[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(8): 1819-1823.

[32] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(2): 181-202.

[33] Fan H B, Hong W. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 147(2-3): 99-107.

Variation characteristics of canopy nutrients during the rainfall process of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* in the Gurbantunggut Desert

YUE Yue-meng[1,2,3], LI Chen-hua[1,2], XU Zhu[4], TANG Li-song[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China;* 2. *Fukang Station of Desert Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang* 831505, *Xinjiang, China;* 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China;* 4. *Bogda Ecological Environment Monitoring Station, Tianchi Lake in Xinjiang Management Committee, Fukang* 831500, *Xinjiang, China*)

Abstract: Nutrients are relatively scarce in arid regions, and adequate nutrient input after rainwater flows through the canopy is of great significance to the growth and development of plants in arid regions. Through the study of canopy nutrients during the rainfall process of *Haloxylon ammodendron* and *H.persicum*, which were the main dominant species in the southern margin of the Gurbantunggut Desert, the concentration differences of carbon, nitrogen, and phosphorus in stemflow, throughfall, and rainwater were analyzed, and the concentration degree of ions after rainwater flows through the plant canopy was determined. The results showed that the total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) concentrations of rainwater increased significantly after passing through the canopy of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum*, and the total phosphorus (TP) did not increase significantly. The change of ammonium nitrogen (NH_4^+ −N) concentration is basically consistent with that of TN, and the difference between nitrate-nitrogen (NO_3^- −N) and nitrite-nitrogen (NO_2^- −N) concentrations is not completely significant. Among them, the trunk organic nitrogen (TON) has the highest proportion, and its proportion in TN is always greater than 50%. For the average concentration of different nutrient inputs, in addition to TP and NO_3^- −N, other ions have increased. The concentrations of TP, NO_3^- −N, and NO_2^- −N are lower, and they flow in the stems of stemflow, throughfall, and rain. The coefficient of variation is larger in.

Keywords: *Haloxylon ammodendron*; *Haloxylon persicum*; canopy; ion concentration; Gurbantunggut Desert